

不同施磷处理下棉田土壤磷素吸持特征研究

唐雪霞¹, 杨浩², 盛建东¹, 岳继生³, 陈波浪^{1, 3*}

(1. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 3. 新疆慧尔农业集团股份有限公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 为探究不同施磷水平对棉田土壤磷的固定和释放机制, 对新疆典型棉田 5 种施磷水平 (P0、P75、P150、P300、P450) 及不同层次 (0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm) 的灰漠土进行磷素吸附和解吸特性研究, 结果表明: 土壤磷吸附量随磷肥施用量的增加先增加后减小, 以 P150 处理吸附量最大, P0 和 P75 处理吸附量较小, 其中 P150 处理最大吸附量较 P0 处理增加了 45%; 随土层深度的增加, 各处理吸附量逐渐增大, 处理间吸附量的差异逐渐减小, 40 ~ 60 cm 土层最大吸附量为 0 ~ 5 cm 土层的 2.10 倍。土壤磷的等温吸附曲线与 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 方程的拟合度都达显著水平 ($P < 0.05$), 土壤最大吸附量 (X_m) 与等温吸附曲线一致, 以 0 ~ 5 cm 土层 P75 处理最小, 为 $476.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 随土层深度增加而增加, 吸附常数 (K) 与 X_m 呈相反趋势; 随施磷量的增加, 土壤最大缓冲容量 (MBC) 呈增加趋势, 深层土壤小于表层土壤; 土壤磷素吸附饱和度 (DPS) 以 P75 处理最大, 整体随土层深度的增加而减小。土壤磷解吸量与解吸率随吸附能力的增加而减小; 土层越深, 解吸量与解吸率越小, 其中 0 ~ 5 cm 土层解吸量为 40 ~ 60 cm 土层的 2.06 倍。增施磷肥能够提高棉田土壤贮存磷的能力, 施磷量 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 降低土壤对磷的吸附能力, 增加土壤对磷的解吸, 深层土壤磷的吸附特性受施肥水平的影响较小, 供磷能力小于表层土壤。

关键词: 棉田; 磷; 吸附; 解吸; 灰漠土

磷是植物生长必需的三大营养元素之一, 植物主要从土壤磷库和磷肥中获取磷素^[1]。由于土壤对磷有强烈的吸附固定作用, 磷肥施入土壤后易转化为难以被作物利用的形态, 在土壤中储存起来, 致使磷肥当季利用率偏低^[2]。有关土壤中磷素的积累、有效性以及吸附-解吸的影响, 一直是土壤化学的研究热点^[3]。磷素吸附与解吸特性是土壤磷素的主要化学行为之一, 主要受 pH 值、有机质含量、土壤类型和质地、土地利用方式、施肥水平及土层深度等多种因素影响^[4-9]。在特定的土壤类型和土地利用方式下, 施肥量和土层深度是影响磷素吸附和解吸最直接的因素。兰中东等^[10]对不同处理灰漠土的研究发现, 土壤对磷的吸附量随着施加磷肥量的增加稍有增加。Yan 等^[11]对石灰性土壤的相关研究得出, 与不施肥相比, 施磷肥处理后土壤最大吸

附量和解吸量都有所增加。赵庆雷等^[12]对红壤稻田土壤磷的吸附与解吸研究得出, 对照 0 ~ 20 cm 土层, 各施肥模式对 20 ~ 40 cm 土层磷的吸附特性影响较小。赵树成等^[13]对鄱阳湖滨岸土壤磷素吸附特征的研究中也指出, 0 ~ 20 cm 土层磷的最大吸附量和缓冲能力均大于 20 ~ 40 cm 土层。因此, 探讨施磷水平对不同土层磷素吸持特性的影响将会进一步深化阐述磷肥在土壤中的化学行为。

新疆是我国最大的优质棉生产基地, 施肥是棉花持续高产稳产的重要途径, 农民对磷肥的投入逐年增多, 而磷肥的当季利用率一般仅为 10% ~ 25%^[14], 致使耕层土壤磷素大量累积, 在过去 30 年间 (1980 ~ 2010 年) 棉田土壤有效磷含量从 $4.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $16.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相当于耕层土壤中累积了 168 万 t 纯磷^[15]。探索棉田土壤磷素有效性及磷肥利用率的结果显示, 过量磷肥施用 ($> \text{P}_2\text{O}_5 \ 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 显著提高耕作层有效磷和全磷含量, 而适量施磷 ($\text{P}_2\text{O}_5 \ 75 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 磷素利用效率最高^[16]。土壤磷的吸附解吸过程能够表征磷素在土壤中的积累特征, 其吸附反应是控制磷肥利用效率的关键过程, 在不同供磷强度下吸附

收稿日期: 2020-02-19; 录用日期: 2020-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31960629); 博士后课题。

作者简介: 唐雪霞 (1995-), 女, 河南沈丘人, 在读硕士研究生, 主要从事植物营养学研究。E-mail: 2638405766@qq.com。

通讯作者: 陈波浪, E-mail: chenwang200910@sina.com。

固定机制存在差异^[17],明确不同施磷水平下不同土层中土壤磷素吸附解吸特性,可以表征在土壤垂直空间上磷素利用效率的高低及变化,也可为磷肥科学施用提供重要依据。目前对于新疆棉田土壤磷素的吸附解吸特性研究对象多为表层土壤,而探讨供磷水平下不同土层棉田土壤磷素吸持特征的研究较少。为此,本文以新疆北部典型棉田灰漠土为研究对象,探讨不同施磷水平下各土层的土壤磷素吸持特性,揭示其吸附与解吸规律,为提高棉田磷肥的利用效率提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地为新疆玛纳斯县的新湖农场,棉田土

壤类型是灰漠土,质地为壤土,于2016年开始布置试验。施磷(P_2O_5)处理设置5个水平,进行棉田土壤磷的吸附与解吸试验,分别为0、75、150、300和450 $kg \cdot hm^{-2}$ (记为P0、P75、P150、P300、P450),于4月份在犁地前作基肥一次性施入,所施磷肥为粒状重过磷酸钙(P_2O_5 为46%),每个处理设3个重复,每个小区面积为8.8 m × 8 m,田间管理与本地其他棉田管理一致。

采样时间为2016年8月,棉花花铃期,通过五点采样法采集耕层0~5、5~10、10~20、20~40和40~60 cm的土壤样品,剔除土样中的砾石、地膜和根系等杂物,风干备用。土壤相关肥力特性见表1,测定方法参见《土壤农化分析》^[18]。

表1 不同处理土壤肥力性状

项目	土层深度 (cm)	处理	pH	有机质	有效磷	速效钾	土壤颗粒组成(%)		
			水:土=5:1	($g \cdot kg^{-1}$)	($mg \cdot kg^{-1}$)	($mg \cdot kg^{-1}$)	<0.002 mm	0.002 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 2 mm
本底值	0 ~ 20		8.19	11.16	15.07	182.27	23.22	52.47	24.31
	20 ~ 40		8.29	10.98	12.43	204.70	21.91	51.82	26.27
	40 ~ 60		8.47	7.32	9.68	150.52	21.78	44.51	33.71
花铃期	0 ~ 5	P0	8.13 ± 0.015a	8.15 ± 0.73a	11.85 ± 0.87c	299.59 ± 9.0a	26.22 ± 0.74a	48.65 ± 0.56b	25.13 ± 0.18b
		P75	8.15 ± 0.020a	7.41 ± 0.14a	13.36 ± 0.68bc	246.18 ± 3.7b	19.74 ± 0.50b	54.32 ± 0.95a	25.94 ± 0.45b
		P150	8.14 ± 0.058a	6.87 ± 0.31a	15.43 ± 0.58ab	296.12 ± 3.5a	19.20 ± 0.50bc	55.04 ± 0.59a	25.76 ± 0.09b
		P300	8.08 ± 0.017a	7.65 ± 0.28a	17.73 ± 0.75a	305.41 ± 4.2a	18.58 ± 0.05bc	55.48 ± 0.45a	25.94 ± 0.40b
		P450	8.08 ± 0.016a	7.84 ± 0.11a	18.16 ± 0.44a	316.46 ± 2.5a	16.80 ± 0.45c	54.22 ± 0.54a	28.98 ± 0.09a
	5 ~ 10	P0	8.01 ± 0.029a	8.02 ± 0.42ab	5.81 ± 0.25a	259.01 ± 2.5b	21.80 ± 0.46a	52.98 ± 0.56a	25.22 ± 0.10d
		P75	8.07 ± 0.017a	7.31 ± 0.12b	6.24 ± 0.54a	219.12 ± 4.1c	19.20 ± 0.05b	50.36 ± 0.01b	30.44 ± 0.04c
		P150	8.03 ± 0.023a	7.52 ± 0.22ab	7.05 ± 0.77a	257.55 ± 2.1b	18.18 ± 0.30bc	50.94 ± 0.25ab	30.88 ± 0.05c
		P300	7.98 ± 0.012a	8.03 ± 0.14ab	7.46 ± 0.83a	262.42 ± 5.1ab	17.19 ± 0.04c	47.72 ± 0.34c	35.09 ± 0.30b
		P450	7.98 ± 0.033a	8.63 ± 0.36a	7.78 ± 0.36a	275.31 ± 3.4a	17.09 ± 0.03c	45.20 ± 0.43d	37.71 ± 0.40a
	10 ~ 20	P0	7.97 ± 0.011a	8.33 ± 0.53ab	5.47 ± 0.23a	277.63 ± 3.1b	22.17 ± 0.54a	51.75 ± 0.74b	26.08 ± 0.20e
		P75	8.02 ± 0.020a	7.92 ± 0.17ab	5.63 ± 0.14a	223.80 ± 4.0c	17.65 ± 0.09b	53.85 ± 0.14a	28.50 ± 0.05d
		P150	8.02 ± 0.025a	7.13 ± 0.36b	5.75 ± 0.91a	275.94 ± 3.2b	17.54 ± 0.09b	49.99 ± 0.18bc	32.47 ± 0.27c
		P300	7.99 ± 0.011a	7.70 ± 0.13ab	5.85 ± 0.69a	279.99 ± 4.2b	16.87 ± 0.09b	48.69 ± 0.08c	34.44 ± 0.01b
		P450	7.93 ± 0.024a	8.52 ± 0.16a	5.45 ± 0.23a	301.66 ± 4.9a	16.37 ± 0.00b	48.19 ± 0.00c	35.44 ± 0.00a
	20 ~ 40	P0	8.03 ± 0.022ab	7.68 ± 0.53a	3.91 ± 0.60a	286.40 ± 5.4b	22.81 ± 0.40a	49.45 ± 0.67b	27.74 ± 0.27cd
		P75	8.09 ± 0.042a	7.15 ± 0.15ab	4.00 ± 0.25a	193.14 ± 5.8c	22.34 ± 0.09a	50.34 ± 0.00b	27.32 ± 0.09d
		P150	8.06 ± 0.025ab	7.13 ± 0.29ab	4.46 ± 0.73a	277.60 ± 6.4b	18.33 ± 0.00b	52.98 ± 0.27a	28.69 ± 0.27bc
		P300	8.04 ± 0.027ab	6.31 ± 0.27b	4.55 ± 0.40a	282.29 ± 5.1b	17.50 ± 0.05b	52.94 ± 0.04a	29.56 ± 0.09ab
		P450	7.96 ± 0.014b	6.99 ± 0.23ab	5.69 ± 0.51a	315.38 ± 4.1a	17.24 ± 0.18b	52.46 ± 0.22a	30.30 ± 0.04a
	40 ~ 60	P0	8.26 ± 0.019ab	5.99 ± 0.32a	1.54 ± 0.35c	201.27 ± 2.1d	19.91 ± 0.30a	47.97 ± 0.21a	32.12 ± 0.09c
		P75	8.22 ± 0.025abc	4.82 ± 0.16b	2.34 ± 0.14bc	210.10 ± 8.1cd	17.89 ± 0.09b	49.40 ± 0.21a	32.71 ± 0.30bc
		P150	8.20 ± 0.010bc	4.87 ± 0.22ab	2.39 ± 0.21abc	229.51 ± 3.4bc	16.83 ± 0.45b	49.86 ± 0.63a	33.31 ± 0.18ab
		P300	8.17 ± 0.024c	4.81 ± 0.42b	2.99 ± 0.48ab	236.92 ± 2.8b	16.58 ± 0.27b	49.72 ± 0.29a	33.70 ± 0.02ab
		P450	8.30 ± 0.021a	4.01 ± 0.13b	3.50 ± 0.18a	271.88 ± 5.6a	16.54 ± 0.09b	49.46 ± 0.29a	34.00 ± 0.20a

注:同列数据后不同字母表示处理间有显著性差异($P < 0.05$)。

1.2 试验方法

1.2.1 磷素等温吸附

称取过 0.5 mm 筛的风干土样 2.0 g 若干份, 分别放入 50 mL 离心管, 然后分别向其中加入 5、10、20、30、40、50、75、100、150、200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷标准溶液 40 mL, (磷标准溶液含 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2), 同时加入甲苯 3 滴或者几滴以抑制微生物生长, 用盖子封好, 震荡 2 h, 然后放入 25℃ 恒温箱中存放 24 h, 其间每隔 12 h 震荡一次, 每次 30 min, $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 最后以 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 用钼锑抗比色法测定平衡溶液中的磷浓度, 吸附磷量为加入磷量与残留磷量之差。以平衡溶液磷浓度为横坐标, 土壤吸附磷量为纵坐标作图, 即得磷的恒温吸附曲线。

1.2.2 磷的等温解吸

将以上经过吸附试验的土壤用饱和 NaCl 溶液 30 mL 洗涤, 使土壤与溶液充分混合 (使土摇起), 继而离心倒去上清液, 重复洗涤一次, 然后加入 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液 40 mL, 震荡 1 h 后于 25℃ 恒温箱放 48 h, 每间隔 12 h 震荡一次, 每次 30 min, 48 h 后离心, 吸取适量上清液进行磷的测定, 计算解吸磷量, 并绘制磷的恒温解吸曲线。磷的吸附-解吸试验中每个处理 2 次重复。

1.2.3 吸附解吸参数计算

采用 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 3 种等温吸附方程拟合棉田土壤磷的等温吸附曲线, 并计算相关参数。其中,

Langmuir 等温吸附方程:

$$C/X = C/X_m + 1/(KX_m) \quad (1)$$

C —平衡溶液磷浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

X —土壤磷吸磷量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);

K —吸附常数;

X_m —土壤最大吸磷量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);

土壤磷最大缓冲容量 ($MBC=KX_m$), 是判断土壤供磷特性的一项综合指标^[19]。磷吸附饱和度 ($DPS=P-\alpha x/X_m \times 100\%$, $P-\alpha x$ 是有效磷含量。) 是评判农田土壤磷素流失风险的重要指标, 一般认为, DPS 越高, 土壤磷流失风险越大^[20]。

Freundlich 等温吸附方程:

$$\lg X = 1/n \lg C + \lg K \quad (2)$$

C —平衡溶液磷浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

X —土壤磷吸磷量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);

K —磷吸附强度的经验系数 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);

n —受吸附强度影响的非均相因子^[21] ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

Temkin 等温吸附方程:

$$X = K_1 \ln(K_2 C) \quad (3)$$

C —平衡溶液磷浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

X —土壤磷吸磷量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);

K_1 —磷吸附常数 ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$);

K_2 —强度常数^[22]。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 软件对数据进行处理和分析, Origin 2018 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 棉田土壤磷的吸附特性

2.1.1 土壤磷的等温吸附特性

土壤磷的等温吸附曲线如图 1 所示: 各施磷处理的土壤磷素吸附量在各个土层中变化趋势相似, 吸附量随平衡液磷浓度的增加而逐渐增大, 但不同处理以及土层间存在差异。各土层平衡液磷浓度在 $0 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 处理间土壤磷吸附量增长趋势相似, 差异不显著; 随平衡液磷浓度的增加处理间吸附量差异逐渐增大。在 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 土层中, P_0 与 P_{75} 处理吸附量在平衡液浓度较低 ($40 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时明显低于其他处理, 平衡液浓度高时 ($100 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) P_0 处理吸附量快速增加, 与 P_{150} 、 P_{300} 和 P_{450} 处理显著高于 P_{75} 处理。 $5 \sim 10$ 与 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的吸附量变化趋势基本一致, 平衡液磷浓度在 $0 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, P_0 和 P_{75} 处理吸附量较小; $100 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, P_{75} 处理吸附量小于 P_0 和 P_{450} 处理, P_{150} 和 P_{300} 处理的吸附量最大; $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土层处理间吸附量差异相对较小。 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层吸附曲线的高低排列与前 3 个土层基本一致, 处理间吸附量差异不大。在 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层中, P_{300} 处理吸附量最大, 其他 4 个处理在平衡液磷浓度 $0 \sim 120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, $P_{450} > P_{150} > P_{75} > P_0$; 在 $120 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, P_{450} 处理吸附趋势相对变缓, 其他处理趋势保持不变。

除 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层吸附程度变化趋势相对稳定外, 其他土层吸附曲线在平衡液浓度为 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右会有不同程度的上升趋势, 且不同施磷处理间吸附曲线的高低排列相似, 均为较高磷处理的吸附量大于高磷处理和低磷处理。不同土层间比较, 随土层深度的增加, 不同施磷处理间吸附量

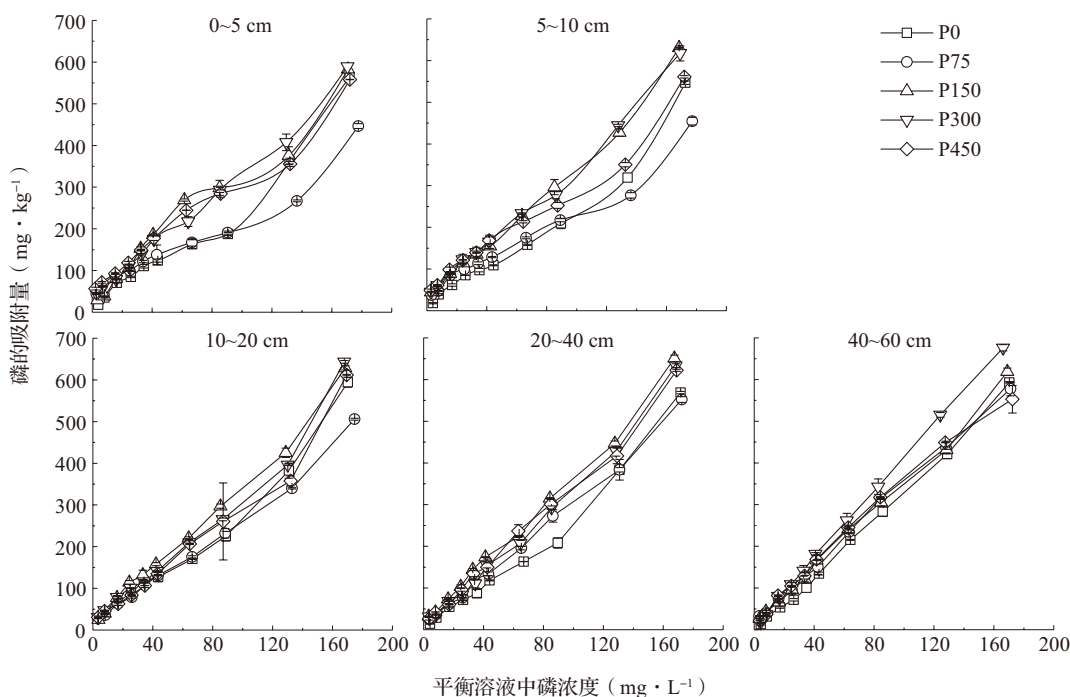


图1 棉田土壤磷的等温吸附曲线

的差异逐渐减小, 吸附量逐渐增大; 40 ~ 60 cm 土层的磷素吸附量最大, 除 P300 外, 处理间差异不显著。

2.1.2 土壤磷素吸附方程及参数

关于土壤对磷素的吸附特性, 常采用 Langmuir 方程、Temkin 方程和 Freundlich 方程来拟合其固体表面吸附量和溶液平衡浓度之间的关系, 并可以通过等温吸附方程计算出一系列吸附参数。磷的吸附解吸试验中棉田土壤磷的等温吸附曲线符合 Langmuir、Temkin 和 Freundlich 等温吸附方程, 其拟合方程及相关参数见表 2。

由表 2 可以看出, 比较相关系数 r 大小, Langmuir 方程拟合度达显著水平 ($P < 0.05$), Freundlich 和 Temkin 方程拟合度均达极显著水平 ($P < 0.01$), 尤以 Freundlich 方程拟合效果最好, 相关系数 r 均在 0.9346 以上。Freundlich 方程中的常数 n 为受吸附强度影响的非均相因子, 当 n 值大于 2 时, 吸附很难发生, 本研究结果显示除 0 ~ 5 cm 土层 P75 处理外, 其他处理的 n 值都小于 2, 表明吸附反应较容易发生。Temkin 方程是在化学吸附的基础上推导出来的一个理论公式^[23], 本研究的试验土壤与 Temkin 方程拟合相关性都达极显著水平, 说明外源加入磷浓度在 0 ~ 200 mg · L⁻¹ 范

围内, 该棉田土壤对磷的吸附以化学吸附为主。由 Langmuir 方程拟合出的土壤最大吸附量 (X_m) 和吸附常数 (K) 是表征土壤对磷吸附特征的重要参数, X_m 反映土壤胶体吸附点位的多少^[24], 是土壤磷库容量的一种标志, 当磷库达到一定容量时, 土壤才有可能向作物提供养分^[23]。而吸附常数 K 是土壤吸附的强度因素, 在一定程度上反映了土壤对磷的吸附结合能力^[25], 若 K 为正值, 说明吸附反应在常温下是自发进行的, K 值越大, 反应的自发程度越强, 生成物较稳定, 因而供磷强度较弱。本研究中 X_m 与等温吸附曲线一致, 以 P75 处理最小, 随土层深度增加整体呈增加趋势, Langmuir 方程拟合的参数 K 均为正值, 其值与 X_m 值变化趋势相反。土壤最大缓冲容量 (MBC) 是磷吸附强度与容量两个因子的综合参数, 该值越大, 说明土壤贮存磷的能力越强, 供磷潜力越大。如表 3 所示, 随施磷量的增加, MBC 值整体呈增加趋势, 深层土壤 MBC 值小于表层土壤。磷素吸附饱和度 (DPS) 反映了土壤有效磷含量与最大吸附量之间的比例关系^[23], 处理间的 DPS 值变化规律不明显, 但是 P75 处理 DPS 值明显较大, 整体随土层深度的增加而减小, 个别处理间有略微的差异。

表 2 不同处理等温吸附方程及参数

土层深度 (cm)	处理	Langmuir 等温吸附式			Freundlich 等温吸附式			Temkin 吸附等温式		
		Xm ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	K	r	n ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	K ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	r	K1 ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)	K2	r
0 ~ 5	P0	625.00	0.0064	0.7703	1.1915	5.6520	0.9752	115.77	0.1252	0.8244
	P75	476.19	0.0123	0.8149	2.0012	22.9403	0.9433	74.79	0.2660	0.8280
	P150	1111.11	0.0050	0.8379	1.2674	9.2470	0.9840	127.70	0.1573	0.9019
	P300	909.09	0.0068	0.7511	1.6210	18.4587	0.9467	113.50	0.3231	0.8511
	P450	666.67	0.0113	0.8386	1.9320	28.1190	0.9346	96.91	0.2836	0.8492
5 ~ 10	P0	588.24	0.0065	0.8168	1.2203	5.8251	0.9879	109.97	0.1257	0.8228
	P75	555.56	0.0093	0.8160	1.6852	15.6063	0.9831	84.66	0.2031	0.8547
	P150	1000.00	0.0060	0.6963	1.5499	16.7726	0.9749	121.71	0.1849	0.8404
	P300	909.09	0.0071	0.7390	1.5898	18.3274	0.9797	119.66	0.1959	0.8469
	P450	666.67	0.0102	0.8106	1.7889	22.5372	0.9776	99.32	0.2373	0.8423
10 ~ 20	P0	833.33	0.0049	0.7310	1.2134	6.4759	0.9829	153.77	0.0838	0.8540
	P75	625.00	0.0069	0.7947	1.3149	7.8505	0.9886	106.69	0.1406	0.8581
	P150	1666.67	0.0029	0.7239	1.2028	7.5805	0.9968	137.32	0.1383	0.8726
	P300	1250.00	0.0040	0.6352	1.3305	9.8424	0.9858	128.02	0.1445	0.8308
	P450	666.67	0.0071	0.7449	1.3307	9.0407	0.9786	121.13	0.1403	0.8266
20 ~ 40	P0	1428.57	0.0022	0.6653	1.0525	3.3970	0.9936	124.72	0.1088	0.8315
	P75	833.33	0.0054	0.7660	1.2246	6.8171	0.9898	121.89	0.1327	0.8660
	P150	1666.67	0.0031	0.6514	1.2621	9.2470	0.9899	140.01	0.1451	0.8661
	P300	1250.00	0.0035	0.6972	1.2367	7.6842	0.9793	135.12	0.1333	0.8452
	P450	1000.00	0.0051	0.7976	1.1956	7.1763	0.9920	137.09	0.1345	0.8707
40 ~ 60	P0	1428.57	0.0032	0.6331	0.9861	3.0283	0.9971	141.45	0.1097	0.8723
	P75	1428.57	0.0034	0.6567	1.2928	9.3648	0.9866	129.96	0.1478	0.8781
	P150	1666.67	0.0029	0.6719	1.2105	7.6472	0.9927	137.92	0.1372	0.8750
	P300	2000.00	0.0025	0.7149	1.0210	4.6516	0.9986	165.17	0.1239	0.8976
	P450	1428.57	0.0034	0.8833	1.1579	6.6988	0.9983	135.56	0.1396	0.9122

注: r 为相关系数, 样本数 n=10, $r_{0.05}=0.632$, $r_{0.01}=0.765$ 。

表 3 不同处理土壤磷的吸附参数

处理	0 ~ 5 cm		5 ~ 10 cm		10 ~ 20 cm		20 ~ 40 cm		40 ~ 60 cm	
	MBC ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	DPS (%)	MBC ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	DPS (%)	MBC ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	DPS (%)	MBC ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	DPS (%)	MBC ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	DPS (%)
P0	3.99	1.90	3.85	0.99	4.07	0.66	3.13	0.27	4.57	0.11
P75	5.84	2.81	5.19	1.12	4.29	0.90	4.48	0.48	4.87	0.16
P150	5.52	1.39	6.00	0.70	4.84	0.34	5.12	0.27	4.83	0.14
P300	6.19	1.95	6.45	0.82	4.99	0.47	4.32	0.36	5.02	0.15
P450	7.55	2.72	6.81	1.17	4.72	0.82	5.08	0.57	4.83	0.24

2.2 棉田土壤磷的解吸特性

土壤中磷的解吸通常被认为是吸附的逆过程, 涉及到被吸附磷的再利用, 提高了土壤中磷的有效性^[26]。土壤磷的等温解吸曲线如图 2 所示, 随外源加入磷浓度的增加, 不同施磷水平的土壤磷素解吸量在各个土层中均呈现增加的趋势, 且处理间解吸曲线的大小排列与吸附曲线相反, 表明土壤磷解吸量与外源加入的磷浓度有关。在 0 ~ 5 cm 土层内, P150 解吸量明显小于其他处理, 解吸曲线较为平稳; 其他 4 个处理随外源磷浓度的增加, 解吸曲线先快速上升然后趋于平缓, 而后再快速上升。在加入磷浓度为 0 ~ 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,

解吸量的大小顺序为 $\text{P75} > \text{P450} > \text{P300} > \text{P0} > \text{P150}$; 100 ~ 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, P0 处理解吸量急剧增加, 大于其他处理。除 0 ~ 5 cm 土层外, 其它土层在加入磷浓度 0 ~ 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 磷解吸量变化较为平缓; 50 ~ 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 各处理的解吸曲线有不同程度的上升趋势。其中, 以 P0 和 P75 处理上升幅度最大, P150、P300 和 P450 处理上升幅度相对较小。

土壤不同层次间比较, 随土层深度的增加, 不同施磷处理间解吸量的差异先减小后增加; P0 和 P75 处理的解吸曲线随土层深度的变化呈先降低后升高的趋势, P150、P300 和 P450 处理解吸曲线则

呈降低趋势,解吸量整体随土层深度的增加而逐渐减小。

磷解吸量占解吸前吸附磷量的百分数即为磷的解吸率,如图3所示,试验土壤磷的解吸率与等温解吸曲线呈相反趋势,随外源加入磷浓度的增加,

磷解吸率整体呈下降趋势。但是不同处理间解吸率的大小排列与解吸曲线相似,P0和P75处理最大,P300和P450处理相对较小,P150处理解吸率最小,不同土层间有些许差异。随土层深度的增加,解吸率逐渐减小。

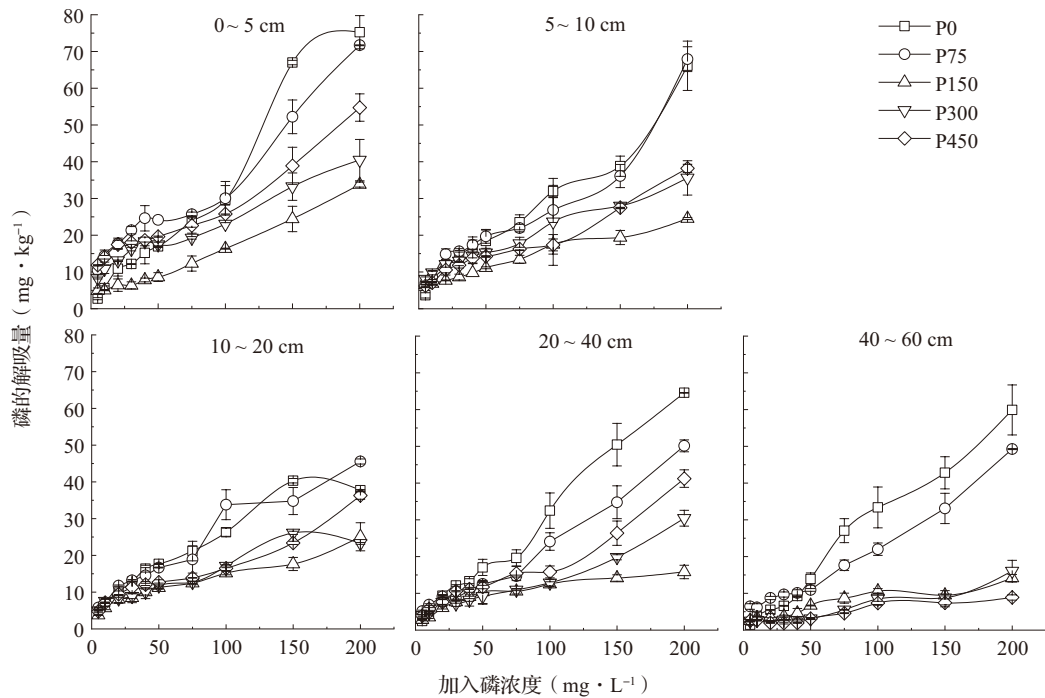


图2 棉田土壤磷的等温解吸曲线

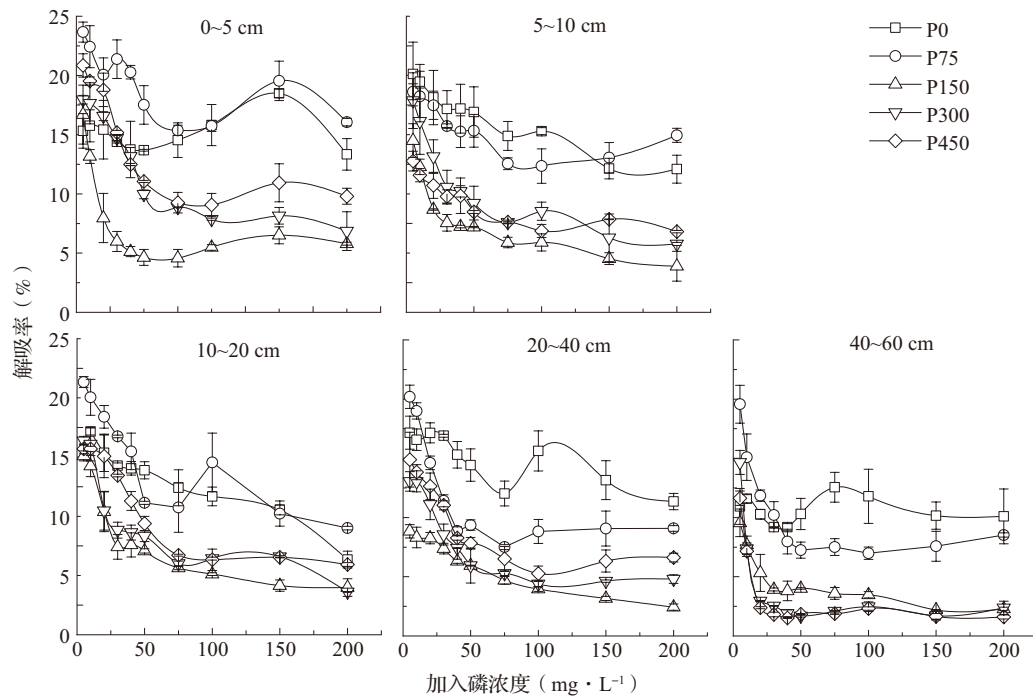


图3 棉田土壤对吸附磷的解吸率

3 讨论

3.1 不同处理对棉田土壤磷素吸附特性的影响

土壤对磷的吸附能力受施磷量、土壤的外部及内部环境等多种因素影响^[4]。本试验设置了5个水平的施磷处理,从施磷量和不同土层两个方面研究棉田土壤的磷吸附和解吸特性。磷的等温吸附曲线一般表现为随外源磷量的增加,吸附程度变化先急后缓、最终趋于平衡趋势,而本研究等温吸附曲线在起始磷浓度为 $0 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,除 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层外,其他土层吸附曲线于起始磷浓度 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处有不同程度向上的折点,这可能是土壤对磷素吸附固定基质的转变点。Freeman等^[27]研究发现,碱性钙质土壤中, CaCO_3 在低磷浓度下吸收P离子,而不与磷素发生沉淀反应;McLaughlin等^[17]研究指出,土壤中磷浓度较高时, CaCO_3 与磷素的沉淀反应可能占土壤磷吸附的主导地位。尹金来等^[28]对土壤磷素固定的研究中得出,当起始磷浓度较低($0 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时,以粘粒固定作用为主, CaCO_3 沉淀作用不明显;起始磷浓度高($>200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时,则粘粒与 CaCO_3 同时起作用,其中 CaCO_3 和磷之间的沉淀反应非常突出。本研究等温吸附曲线最明显的折点在起始磷浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处,高磷浓度下土壤磷素吸附固定量有所增加,磷素利用率降低。

等温吸附曲线向上转折前,吸附量随田间施肥量的增加先增加后减小。该趋势与不同处理下土壤有机质含量的变化相对应(表1),随施磷量的增加,花铃期土壤有机质含量先减小后增大,有机质通过覆盖在粘粒矿物等表面,影响土壤中磷的吸附和固定^[29]。还有研究表明,土壤总磷含量越低,吸附解吸平衡浓度可能越高,对周围环境的敏感性越强,固磷能力相对较差^[13],对照与低磷处理(P0、P75)土壤磷素含量相对较低,表现出较小的吸附量及较大的解吸量。不同的施磷水平还可能通过影响土壤其他性质,多种因素共同作用,引起处理间吸附量的变化。兰中东等^[10]在以不施肥对照和 $75、150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施磷处理的灰漠土磷的吸附试验中,得出结论:单施化肥,土壤对磷的吸附量随着施加磷肥量的增加而增加。本研究施磷水平增加(P300和P450处理),过量磷肥施用可能导致在磷肥基施时,因磷浓度较高而发生沉淀反应,所以花铃期P300和P450处理的土壤吸附量较P150处理

低,有关其具体的影响机制还有待进一步研究。植物根系分泌的有机酸能够消除土壤中部分吸附位点,同时能与土壤磷酸盐中的铁、铝离子络合降低土壤对磷素的固定^[29],本研究棉花大部分根系分布在 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 土层中,其中以P75处理根表面积密度最大,故在土壤垂直空间上除 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 土层外,以 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 土层吸附量最小,不同施磷处理间P75处理吸附量也相对较小(此部分数据本文未列出)。随土层深度的增加,根系分布逐渐减少,土壤有机质、有效磷含量逐渐降低,土壤吸附量逐渐增大。因本研究施磷方式为地表撒施,且磷在土壤中的移动性较差^[30],故土层越深,土壤磷的吸附特性受施肥水平的影响越小,表现为随着距地表深度的加大,处理间吸附差异逐渐缩小。

与不施磷相比,低磷处理(P75)下磷素在土壤中的积累和转化降低了磷的吸附能力,表现出较小的 X_m 值和较大的DPS值,K值与 X_m 值相反的变化趋势表明,土壤磷的吸附潜力变小,吸附反应的自发程度却增强了,而适磷和高磷处理(P150、P300、P450) X_m 值相对较大,这与Shahabifar等^[31]对石灰性土壤施用化学磷肥,低磷土壤 X_m 值降低,K值增加,而中磷土壤 X_m 值增加,K值降低的研究结果相似,表明不同施肥处理间吸附特征的差异受土壤磷素含量影响较大。 X_m 、K值随土层深度增加变化规律不明显,但深层土壤的 X_m 值明显大于表层土壤,K值与之相反,表层土壤对磷的吸附强度较大,而深层土壤磷素含量较低状态下 X_m 值较大,表明在土壤垂直空间上与不同施磷处理间,影响土壤吸磷能力的主要因素不同,土层间吸附特征的变化可能主要受根系分布、有机质等因素影响。施磷肥提高了土壤MBC值,且表层土壤MBC值大于深层土壤,说明增施磷肥能够提高棉田土壤贮存磷的能力,供磷特性增大,进而向土壤提供更多的有效磷,且表层土壤供磷能力大于深层土壤。P75处理较大的DPS值与其吸附能力小相照应,表层土壤吸磷能力较弱,有效磷水平较高,表现出DPS值随土层深度增加而减小。

3.2 不同处理对棉田土壤磷素解吸特性的影响

从等温解吸及解吸率曲线的高低排列可以看出,除 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层解吸量与解吸率随田间施肥量的增加而减小,其他土层都呈现出先减小后增大的规律,以P150处理解吸量最小;与等温吸附曲线相对照,表现出解吸量与解吸率随着吸附能力

的增加而减小,这与邱亚群等^[32]、秦胜金等^[33]研究结果一致,施磷量大的土壤吸附能力强,被吸附的磷难以解吸出来;结合不同施磷处理间吸附与解吸能力的差异,以 P75 处理磷素吸附量较小,解吸能力较强,在施磷量 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下,磷素利用率相对较高。由于 P0 和 P75 处理的解吸曲线随土层深度的变化呈先降低后升高的趋势, P150、P300 和 P450 处理解吸曲线持续降低,所以不同施磷处理间解吸量的差异先减小后增加,解吸量整体逐渐减小。低磷处理解吸曲线在不同土层中的变化特征可能是受土壤最大吸附量的影响,还有待进一步研究。土层越深,土壤有机质含量逐渐降低,有机阴离子竞争吸附的能力下降,吸附量越大,解吸量与解吸率越小,其中 0 ~ 5 cm 土层解吸量为 40 ~ 60 cm 土层的 2.06 倍;高秀美等^[34]对蔬菜地的相关研究也是 0 ~ 5 cm 土层解吸量约为 5 ~ 20 cm 土层的 2 倍,深层土壤对磷素的吸附能力较大,固持性强,其解吸磷的能力相应较弱。表层土壤较强的磷素解吸能力为棉花生长尽可能地提供较多的磷素,深层土壤解吸能力较弱,减少磷素向地下淋失。

4 结论

在外源磷浓度 0 ~ $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,棉田土壤磷的等温吸附曲线与 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 方程的拟合度都达显著水平;不同外源磷浓度范围内棉田土壤表现有不同的吸附和固定机制,起始磷浓度 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为土壤对磷素吸附固定基质的转变浓度,磷浓度较低时主要是吸附反应,磷浓度过高可能会发生沉淀反应。由 Langmuir 方程拟合的最大吸附量 (X_m) 与等温吸附曲线基本一致,随田间施肥量的增加先增加后减小,以 P75 处理最小,随土层深度增加整体呈增加趋势;不同处理间的吸附常数 (K) 值与 X_m 值变化趋势相反;土壤最大缓冲容量 (MBC) 值随施磷量的增加而增加,深层土壤小于表层土壤;处理间磷素吸附饱和度 (DPS) 变化规律不明显, P75 处理显著大于其他处理,随土层深度的增加而减小。由 Langmuir 方程拟合的吸附参数变化特征表明,增施磷肥能够提高棉田土壤贮存磷的能力,供磷特性增大,土层越深,土壤磷的吸附特性受施肥水平的影响越小;解吸量与解吸率随着吸附能力的增加而减小。

参考文献:

- [1] 韩晓飞, 谢德体, 高明, 等. 减磷配施有机肥对水旱轮作紫色水稻土磷素淋失的消减效应 [J]. 生态学报, 2017, 37 (10): 3525-3532.
- [2] MacDonald G K, Bennett E M, Potter P A, et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands [J]. Proc Natl Acad Sci, U S A, 2011, 108: 3086-3091.
- [3] Wang L Q, Liang T. Effects of exogenous rare earth elements on phosphorus adsorption and desorption in different types of soils [J]. Chemosphere, 2014, 103: 148-155.
- [4] 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响 [J]. 土壤学报, 1991, 28 (1): 7-15.
- [5] Zhang Y H, Huang S M, Guo D D, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of different textural fluvo-aquic soils under long-term fertilization [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19 (3): 1306-1318.
- [6] 徐敏, 宋春, 毛璐, 等. 不同土地利用方式下紫色土磷吸附-解吸动力学特征 [J]. 水土保持通报, 2015, 35 (5): 39-44.
- [7] 夏立忠, Anderson R. 长期施用牛粪条件下草原土壤磷的等温吸附与解吸动力学 [J]. 土壤, 2000, 32 (3): 160-164.
- [8] 何帅, 尹飞虎, 谢海霞. 新疆地带性土壤磷吸附特性影响因素研究 [J]. 新疆农业科学, 2017, 54 (8): 1513-1522.
- [9] 颜晓, 卢志红, 魏宗强, 等. 几种典型酸性旱地土壤磷吸附的关键影响因素 [J]. 中国土壤与肥料, 2019 (3): 1-7.
- [10] 兰中东, 王周琼. 不同处理的灰漠土对磷吸附与解吸的影响 [J]. 干旱区研究, 2002, 19 (3): 49-51.
- [11] Yan Z J, Chen S, Dari B, et al. Phosphorus transformation response to soil properties changes induced by manure application in a calcareous soil [J]. Geoderma, 2018, 322: 163-171.
- [12] 赵庆雷, 吴修, 袁守江, 等. 长期不同施肥模式下稻田土壤磷吸附与解吸的动态研究 [J]. 草业学报, 2014, 23 (1): 113-122.
- [13] 赵树成, 张展羽, 夏继红, 等. 鄱阳湖滨岸土壤磷素吸附特征研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28 (1): 166-174.
- [14] 李青军, 张炎, 哈丽哈什·依巴提, 等. 棉花高产和磷高效的磷肥基施追施配合技术研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (1): 146-153.
- [15] Mai W X, Xue X R, Feng G, et al. Can optimization of phosphorus input lead to high productivity and high phosphorus use efficiency of cotton through maximization of root / mycorrhizal efficiency in phosphorus acquisition? [J]. Field Crops Research, 2018, 216: 100-108.
- [16] 顾惠敏, 陈波浪, 王庆惠. 施磷对不同质地棉田土壤磷素有效性及磷肥利用率的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2019 (3): 100-108.
- [17] McLaughlin M J, McBeath T M, Smernik R, et al. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils—implications for fertilizer management and design: an Australian perspective [J]. Plant and Soil, 2011, 349: 69-87.

- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 洪欠欠, 颜晓, 魏宗强, 等. 长期施肥与土壤性质对水稻土磷吸附的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2018 (3): 61-66, 84.
- [20] 夏海勇, 王凯荣. 有机质含量对石灰性黄潮土和砂姜黑土磷吸附-解吸特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (6): 1303-1310.
- [21] 李仁英, 吴洪生, 黄利东, 等. 不同来源生物炭对土壤磷吸附解吸的影响 [J]. 土壤通报, 2017, 48 (6): 1398-1403.
- [22] 张亮. 长期施肥对栗褐土钾素、磷素吸附与解吸特性的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- [23] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安, 等. 不同质地棉田土壤对磷吸附与解吸研究 [J]. 土壤通报, 2010, 41 (2): 303-307.
- [24] 王斌, 刘骅, 李耀辉, 等. 长期施肥条件下灰漠土磷的吸附与解吸特征 [J]. 土壤学报, 2013, 50 (4): 726-733.
- [25] 夏文建, 冀建华, 刘佳, 等. 长期不同施肥红壤磷素特征和流失风险研究 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 (12): 1876-1886.
- [26] Heidari S, Reyhanitabar A, Oustan S. Kinetics of phosphorus desorption from calcareous soils using DGT technique [J]. Geoderma, 2017, 305: 275-280.
- [27] Freeman J S, Rowell D L. The adsorption and precipitation of phosphate onto calcite [J]. Soil Sci, 1981, 32 (1): 75-84.
- [28] 尹金来, 曹翠玉, 史瑞和. 徐淮地区石灰性土壤磷素固定的研究 [J]. 土壤学报, 1989, 26 (2): 131-138.
- [29] 张鑫, 谷会岩, 陈祥伟. 择伐干扰对小兴安岭阔叶红松林土壤磷吸附解吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29 (1): 11-17.
- [30] 鲁如坤, 时正元, 顾益初. 土壤积累态磷研究 II. 磷肥的表观积累利用率 [J]. 土壤, 1995, 27 (6): 286-289.
- [31] Shahabifar J, Panahpour E, Moshiri F, et al. The quantity / intensity relation is affected by chemical and organic P fertilization in calcareous soils [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 172: 144-151.
- [32] 邱亚群, 甘国娟, 刘伟, 等. 不同利用方式土壤中磷的吸附与解吸特性 [J]. 环境工程学报, 2013, 7 (7): 2757-2762.
- [33] 秦胜金, 张玉树, 胡晓霞, 等. 不同利用方式下土壤对磷的吸附-解吸特征 [J]. 现代农业科技, 2011 (24): 285-287, 291.
- [34] 高秀美, 汪吉东, 张永春, 等. 蔬菜种植年限对土壤磷素吸附解吸特性的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18 (4): 706-710.

Study on the characteristics of phosphorus sorption in cotton field under different phosphorus application treatments

TANG Xue-xia¹, YANG Hao², SHENG Jian-dong¹, YUE Ji-sheng³, CHEN Bo-lang^{1, 3*} (1. College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang 830052; 2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083; 3. Xinjiang Huier Agriculture Co. Ltd., Changji Xinjiang 831100)

Abstract: In order to explore the mechanism of phosphorus fixation and release in cotton field with different phosphorus application levels, the phosphorus adsorption and desorption characteristics of five phosphorus application levels (P0, P75, P150, P300, P450) and different layers (0 ~ 5, 5 ~ 10, 10 ~ 20, 20 ~ 40, 40 ~ 60 cm) of grey desert soil in typical cotton fields of Xinjiang were studied. The results showed that the adsorption capacity of soil phosphorus increased first and then decreased with the increase of phosphorus application, and the adsorption capacity of P in P150 treatment was the largest. The adsorption capacity of P0 and P75 treatment was small. And the maximum adsorption capacity of P150 treatment increased by 45% compared with that of P0 treatment. With the increase of soil depth, the adsorption capacity of each treatment increased gradually, and the difference among treatments decreased gradually. The maximum adsorption capacity of 40 ~ 60 cm soil layer was 2.10 times of that of 0 ~ 5 cm soil layer. The fitting degrees of isotherm adsorption curve of soil phosphorus with Langmuir, Freundlich and Temkin equation were all significant ($P < 0.05$). The maximum adsorption capacity of soil (X_m) was consistent with isotherm adsorption curve, and P75 treatment in 0 ~ 5 cm soil layer was the smallest, which was $476.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and increased with the depth of soil layer. The adsorption constant (K) was opposite to X_m . The maximum buffer capacity of soil (MBC) increased with the increase of P application, and the deep soil was smaller than the surface soil. The phosphorus adsorption saturation of soil (DPS) was larger at P75 treatment, and decreased with the increase of soil depth. The phosphorus desorption capacity and desorption rate of soil decreased with the increase of adsorption capacity, and the deeper the soil layer, the smaller the desorption capacity and desorption rate. The desorption capacity of 0 ~ 5 cm soil layer was 2.06 times of that of 40 ~ 60 cm soil layer. Application of phosphorus fertilizer improved the ability of soil storage of phosphorus in cotton field, the application amount of $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ reduced the adsorption capacity of soil to phosphorus and increased the desorption of soil to phosphorus. The adsorption characteristics of deep soil phosphorus were less affected by the level of fertilization, and the phosphorus supply capacity was less than that of the surface soil.

Key words: cotton field; phosphorus; adsorption; desorption; grey desert soil